

## ESCENARIOS DE DAÑOS SÍSMICOS EN CATALUÑA

J. Chávez<sup>1,2</sup>, X. Goula<sup>1</sup>, A. Roca<sup>1</sup>, F. Mañá<sup>3</sup>, J. A. Presmanes<sup>3</sup>, A. López-Arroyo<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Servicio Geológico/Institut Cartogràfic de Catalunya. *xgoula@icc.es; roca@icc.es*

<sup>2</sup> Universitat Politècnica de Catalunya.

<sup>3</sup> Institut Tecnològic de la Construcció de Catalunya.

<sup>4</sup> Ofiteco.

### RESUMEN

Se presentan los escenarios de daños sísmicos determinados en cada uno de los municipios de Cataluña tomando como parámetro de entrada de peligrosidad sísmica la intensidad macrosísmica asignada a cada uno de ellos, en el mapa de zonas sísmicas de la región. Igualmente, se presenta la simulación en todo el territorio de Cataluña del escenario de un terremoto equivalente al ocurrido en la provincia de *el Ripollès* (Pirineo Oriental) en 1428. La metodología utilizada en los cálculos de estos escenarios se resume en cuatro pasos: a) clasificación de los edificios de vivienda de cada municipio en clases de vulnerabilidad de acuerdo con la EMS-92; b) estimación del daño potencial que experimentarían los edificios debido a la acción del terremoto considerado en cada caso; c) estimación del daño a la población expuesta al sismo en cada municipio y d) estimación de las pérdidas económicas directas que dicho daño representa para cada municipio.

**Palabras claves:** Cataluña, clases de vulnerabilidad, daño, pérdida, edificio, matriz de probabilidad de daños.

### ABSTRACT

Damage scenarios for each municipality of Catalonia are shown. The seismic hazard input used in this estimation is the macroseismic intensity assigned to towns in the seismic zone map of Catalonia. Another scenario for all the region is carried out taking into account the focal data of an earthquake that took place in the *Ripollès* (*Eastern Pyrenees*) in 1428. The methodology utilized in these computations is summarized in four steps: a) classification of dwelling buildings in vulnerability classes according to EMS-92; b) estimation of physical damage to buildings by means of the damage probability matrices obtained for this scale; c) estimation of damage to people; and d) estimation of economical losses.

**Keywords:** Catalonia, vulnerability classes, damage, lost, dwelling building, damage probability matrices.

### Introducción

Los escenarios de daños sísmicos resultan de los cálculos de los efectos de un determinado terremoto sobre una región dada. Estos pueden contener información referente a estimaciones acerca del número de muertos, heridos, personas sin hogar, pérdidas económicas, entre otras. Datos como éstos son de gran importancia para la planificación de los recursos necesarios para el manejo y la gestión de las emergencias sísmicas.

La necesaria planificación de posibles emergencias sísmicas en Cataluña ha motivado la realización de estas estimaciones, las cuales buscan dar respuesta a lo indicado en la Directriz

Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo Sísmico, que establece que aquellas áreas donde son previsibles sismos de intensidad igual o superior a grado VI para un período de retorno de 500 años, han de elaborar sus propios planes de emergencia ante el riesgo sísmico, para lo cual han de llevar a cabo estudios de riesgo sísmico: peligrosidad, vulnerabilidad y consecuencias sociales y económicas (BOE, 1995).

Como principales objetivos se plantea determinar y aplicar una metodología que permita llevar a cabo la evaluación preliminar del riesgo sísmico a escala regional, cuyos resultados han de estar enfocados hacia la prevención de desastres en regiones de baja-moderada actividad sísmica, como es el caso de Cataluña, en las que consecuentemente, no se dispone de relaciones detalladas de daños de pasados terremotos.

Como parte integrante de la metodología planteada se establece un procedimiento para realizar una clasificación a escala regional de las edificaciones de vivienda, en clases de vulnerabilidad acordes con la Escala Macrosísmica Europea (EMS-92). Asimismo, se obtienen matrices de probabilidad de daños acordes a esta escala, de tal forma que se pueda determinar, de manera estadística, el daño potencial que pueden experimentar las edificaciones a causa de la ocurrencia de un determinado evento sísmico. Se determinará el grado de daño que experimentarían dichas edificaciones para dos tipos de escenarios: el primero correspondiente a las intensidades macrosísmicas asignadas a cada uno de los municipios en el mapa de zonas sísmicas de la región y el segundo correspondiente a la ocurrencia de un terremoto semejante al del *Ripollès* de 1428. Por último, se hará una estimación del daño a la población expuesta al posible terremoto en ambos escenarios y se evaluará el costo económico de reparación y reconstrucción de las edificaciones que podrían resultar dañadas en ambos escenarios.

La metodología desarrollada se resume en cuatro fases: a) clasificación de las edificaciones de vivienda en clases de vulnerabilidad de acuerdo a la EMS-92; esta clasificación se lleva a cabo tomando en cuenta los datos de edad, altura y localización de dichas edificaciones provenientes del censo de edificios realizado en Cataluña en 1990. b) Estimación del daño potencial que experimentarían los edificios al ser sometidos a la acción sísmica considerada en cada municipio; esta estimación se realiza mediante el uso de matrices de probabilidad de daños que al efecto han sido determinadas para las clases de vulnerabilidad (A, B, C, D, E y F) y los grados de intensidad (VI, VII, VIII, IX y X) de la EMS-92. c) Estimación del daño a la población expuesta al evento sísmico considerado en cada municipio; la misma se expresa en términos de heridos, víctimas mortales y personas sin hogar. d) Estimación de las pérdidas económicas que se produzcan como consecuencia del daño físico a las edificaciones.

### **Clasificación de las edificaciones en clases de vulnerabilidad EMS-92**

La clasificación de los edificios de vivienda de Cataluña (cerca de un millón) en clases de vulnerabilidad acorde con la EMS-92 se lleva a cabo partiendo principalmente de los datos del censo de edificios realizado en 1990 por el *Institut d'Estadística de Catalunya*. Esta información, disponible para cada uno de los municipios de la región, está compuesta por la edad, la altura y la localización de dichos edificios. Es muy bien sabido que los dos primeros elementos intervienen considerablemente en la vulnerabilidad de los edificios. La edad es un parámetro que no sólo afecta directamente el proceso de deterioro de la resistencia de los edificios, sino que también refleja las técnicas constructivas que se van utilizando a través del tiempo. Atendiendo a esto, las edificaciones han sido agrupadas de acuerdo a tres períodos

de construcción: anteriores a 1950, entre 1951 y 1970 y posteriores a 1970. La altura, por su parte, influye también en el comportamiento de las edificaciones frente a la sollicitación sísmica. En el caso de los edificios de Cataluña, que han sido construidos únicamente para resistir cargas gravitacionales, este parámetro ha servido para diferenciar aquéllos que tienen márgenes de seguridad para resistir estas cargas y los que se encuentran en el límite de resistencia. Los límites de altura considerados han sido los 12 m. (menos de 5 plantas), que corresponden al primer grupo y los 18 m. (con más de 5 plantas) correspondientes al segundo grupo y a los edificios con más de 5 plantas. Asimismo, se ha considerado un tercer grupo que incluye los edificios que se encuentran en el rango comprendido entre los dos extremos definidos. Por último, ha sido importante considerar la localización porque puede influir en la calidad de la construcción, tanto por los materiales utilizados y por el cumplimiento o no de normativas de construcción. En cuanto a este último parámetro se ha diferenciado entre los edificios construidos en zonas urbanas y los que se encuentran en áreas rurales. En la tabla 1 se presenta una distribución de los edificios de toda Cataluña atendiendo a estos tres parámetros.

**Tabla 1.** Distribución de los edificios de vivienda de Cataluña según altura, período de construcción y ubicación.

Fecha de Construcción		Hasta 1950		1951-1970		Después de 1970	
		Urbana	Rural	Urbana	Rural	Urbana	Rural
Área de Localización							
Altura	< 5 plantas	232740	31119	212070	16304	315504	37346
	= 5 plantas	7065	9	14083	24	11937	22
	> 5 plantas	12699	2	21963	33	22028	44

Como se observa en esta tabla, la gran mayoría de los edificios de Cataluña, alrededor del 90%, se encuentran localizados en núcleos urbanos; similar porcentaje se determina para las edificaciones menores de 5 plantas; en cuanto a la distribución por edad, se advierte el mayor crecimiento de la construcción a partir de 1970, con un 41%.

Otra información utilizada en la clasificación de las edificaciones en clases de vulnerabilidad fue la tipología estructural y el estado de conservación de los edificios. Las diferentes tipologías estructurales utilizadas en Cataluña han sido identificadas a partir de las épocas de construcción consideradas. Así, los edificios construidos hasta 1950 son principalmente de tapia y de muros de fábrica de ladrillos; entre éstos predominan los que tienen suficientes muros de arriostramiento pero que no presentan ningún tipo de zuncho en la unión forjado-pared. Estos edificios son susceptibles a sufrir desvinculaciones en lugares inestables por causa de asentamientos y/o de tensiones térmicas y es de esperar que frente a un sismo presenten un comportamiento frágil debido a su poca ductilidad (Mañà, 1995). Los edificios construidos entre 1950 y 1970 lo fueron mayoritariamente en muros de fábrica de ladrillos; de éstos al menos un 50% carece de zunchos eficaces de hormigón armado y el otro 50% presenta falta de arriostramiento por la carencia de muros transversales a los de carga. Los edificios que se han construido a partir de 1970 lo han sido en la misma tipología constructiva que en el período anterior, pero en este caso las construcciones se hicieron estandarizadas a través de normas de construcción como la MV-201 de 1972 sobre Obra de Fábrica de Ladrillo (Ministerio de la Vivienda, 1973), la cual provocó que las construcciones que se realizaron a partir de 1973 tuviesen que cumplir las condiciones de monolitismo y

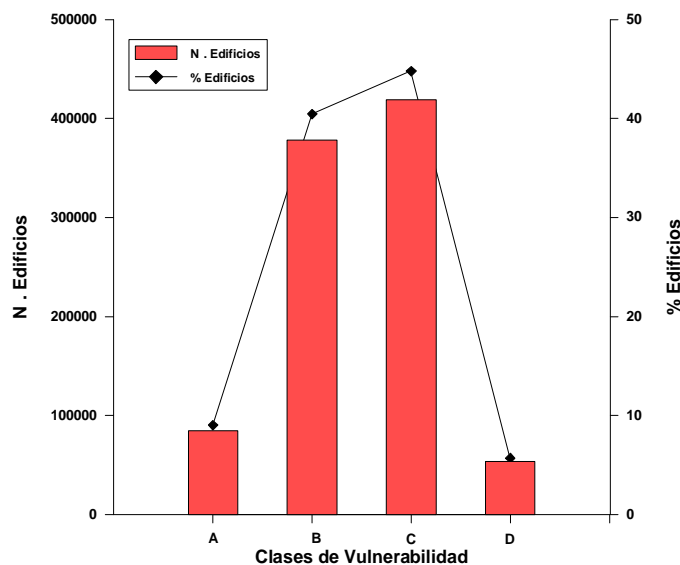
encadenado prescritas por esta norma. En este período también fue introducida la tipología constructiva de hormigón armado, la cual se considera cubre alrededor de un 25% de los edificios de vivienda construido en este período.

La ponderación de toda la información disponible junto con los criterios de la EMS-92 y el juicio de experto permitió llevar a cabo una clasificación de las edificaciones que se expresa en función de los tres principales parámetros, tal como se observa en la tabla 2, reflejándose en los porcentajes de edificios asignados a cada clase de vulnerabilidad la influencia de cada uno de los elementos descritos.

**Tabla 2.** Clasificación de los edificios de Cataluña expresada en porcentajes relativos de las clases de vulnerabilidad de la EMS-92.

Fecha de Construcción		Hasta 1950		1951-1970		Después de 1970	
Área de Localización		Urbana	Rural	Urbana	Rural	Urbana	Rural
Altura	< 5 plantas	20A+80B	30A+70B	5A+50B+45C	15A+70B+15C	85C+15D	5A+20B+65C+10D
	= 5 plantas	20A+80B	40A+60B	10A+60B+30C	20A+70B+10C	5A+20B+65C+10D	10A+30B+55C+5D
	> 5 plantas	40A+60B	60A+40B	15A+70B+15C	30A+65B+5C	8A+27B+60C+5D	15A+45B+40C

Aplicando la clasificación indicada en esta tabla a todos los edificios de Cataluña se ha obtenido que la mayoría de ellos corresponden a las clases de vulnerabilidad B y C, con 40 y 45% respectivamente. Por consiguiente, los menores porcentajes corresponden a las clases de vulnerabilidad, más y menos vulnerable, A y D, con una representación de 9 y 6% cada una. Esta situación se refleja en la figura 1, en la que además se indica el número absoluto de edificios correspondiente a cada clase de vulnerabilidad.



**Figura 1.** Distribución de los edificios de vivienda de Cataluña en clases de vulnerabilidad acorde con la EMS-92.

La clasificación indicada en la tabla 2 fue también aplicada a cada uno de los municipios de Cataluña, obteniéndose los porcentajes de las clases de vulnerabilidad A, B, C y D presentes en cada municipio. Como ejemplo se muestra en la figura 2 la distribución de la clase A, una de las que tiene menor presencia en la región, al igual que la D, en oposición a las clases B y C que alcanzan valores, en muchos de los municipios, de hasta el 80% de los edificios. Como se observa en esta figura, el mayor porcentaje de edificios clase A, alrededor de 30%, se localiza en muy pocos municipios situados en el centro de Cataluña, los cuales tienen muy baja densidad de población y edificación. Contrario a esto, se advierte que la mayoría de los municipios presentan en su parque edificativo entre un 7 y un 18% de edificios clase A.

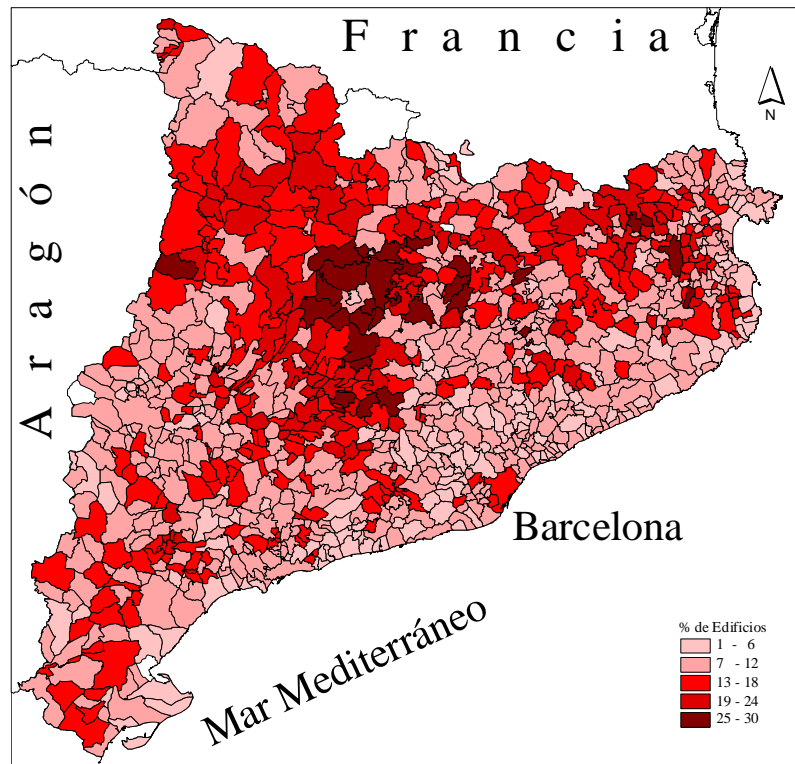


Figura 2. Distribución de la clase de vulnerabilidad A en los municipios de Cataluña.

### Estimación del daño en las edificaciones

La estimación del daño físico que podrían experimentar las edificaciones de vivienda de los diferentes municipios, considerando la ocurrencia de un evento sísmico como el indicado en el mapa de zonas sísmicas de Cataluña (Secanell et al., 1999), se ha llevado a cabo mediante el uso de matrices de probabilidad de daños que han sido determinadas para las clases de vulnerabilidad A, B, C, D, E y F, los grados de daños de 0 (no daño) a 5 (colapso total) y los grados de intensidad (de VI a X) de la escala EMS-92 (Chávez, 1998). Los cálculos se realizan de forma determinista, a partir de la expresión:

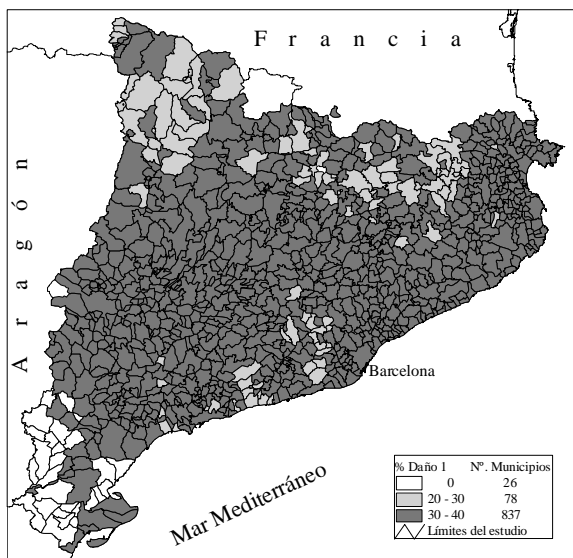
$$P[D_k] = \hat{a}_T P[D_k | I, T] \cdot P[T] \quad (1)$$

donde:

$P[D_k]$  es la probabilidad de que en un determinado municipio se observe un nivel de daño  $D_k$  ( $K = 0 - 5$ ) para una intensidad  $I$ ;  $P[T]$  es la probabilidad de que la edificación pertenezca a la tipología  $T$ , identificada como las clases de vulnerabilidad A, B, C y D y  $P[D_k | I, T]$  es la

probabilidad condicionada de que se observe el nivel de daño  $k$ , dada la intensidad ( $I$ ) y la tipología de la estructura ( $T$ ). Esta probabilidad se corresponde con la de las matrices de probabilidad de daños.

Con esta expresión y para las intensidades representativas en Cataluña (VI, VII y VIII) se realizan las estimaciones de los daños en los edificios de vivienda de los diferentes municipios, los cuales, como resultado, se obtienen clasificados en función de los seis niveles de daños antes indicados. Como ejemplo se presenta en la figura 3 la distribución del grado de daño 1 (daños ligeros) en todos los municipios. Es importante indicar que esta distribución de daños no es una situación simultánea a todos los municipios, sino que responde a las intensidades definidas para cada uno de ellos, en el mapa de zonas sísmicas, no pudiendo en la realidad interpretarse como un escenario para ningún terremoto posible.



**Figura 3.** Distribución de los edificios que experimentarían grado de daño 1.

Como se observa en la figura 3, de presentarse eventos sísmicos de las intensidades previstas en los diferentes municipios de Cataluña la gran mayoría de ellos podrían resultar con daños ligeros en un rango oscilante entre el 30% y el 40% de su parque edificativo, siendo muy pocos los municipios que podrían encontrarse por debajo de este valor.

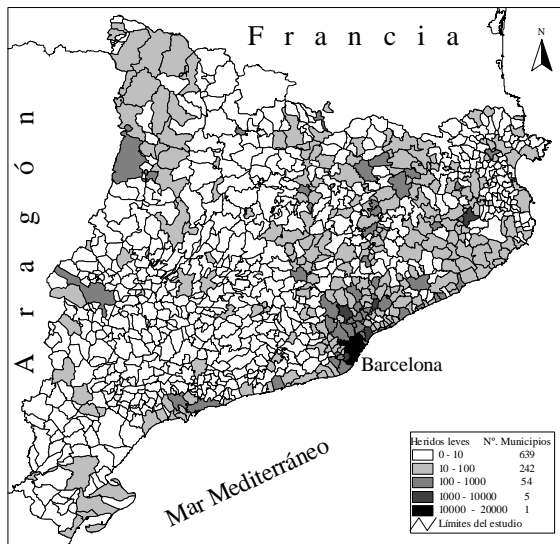
mientras que los máximos porcentajes alcanzados de colapso total oscilan entre el 3% y el 4% de las edificaciones de viviendas de unos tres municipios de muy baja densidad de población, situándose la gran mayoría entre el 1 y el 0% de sus edificios con este grado de daño.

Para los restantes grados de daños se ha determinado que un importante número de municipios pueden experimentar grado de daño 2 entre el 20 y el 30% de sus edificios; muy pocos municipios han resultado que sufrirían grado de daño 3 en más del 20% de sus edificios; la casi totalidad de los municipios se localiza con porcentajes inferiores al 5% de su parque edificativo con grado de daño 4;

A partir del daño experimentado por los edificios se hizo una estimación de los que podrían quedar en condiciones inhabitables, considerándose en este estado aquéllos que sufran los grados de daños 4 y 5 así como un 50% de los que experimenten daño 3. Estos resultados son de suma importancia para la evaluación del número de personas que puede quedar sin vivienda tras la acción del terremoto.

### Estimación del daño a las personas

La estimación del daño a la población, expresado en términos de heridos y muertos se realizó utilizando las metodologías desarrolladas por Coburn *et al.* (1992) y el ATC-13 (1985). La primera permite evaluar las víctimas provocadas por el colapso de edificios, o sea grado de daño 5; mientras que, la segunda proporciona una distribución de víctimas en función de cada uno de los grados de daño antes indicados.



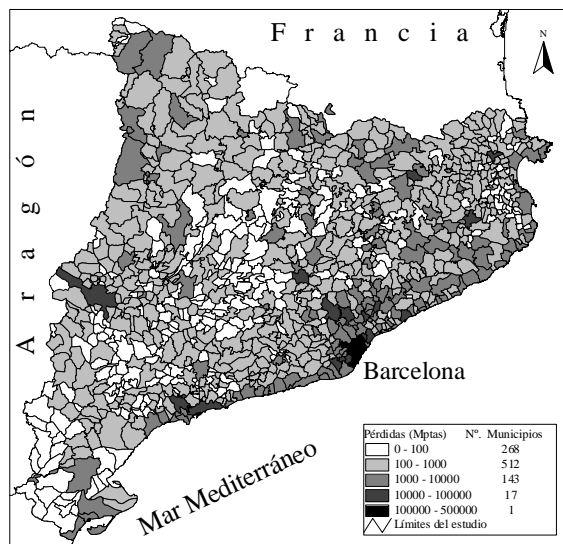
**Figura 4.** Distribución del número de personas con heridas leves como resultado de la acción sísmica característica de cada municipio.

En la figura 4 se presentan los resultados de los cálculos realizados, utilizando la metodología ATC-13 (1985), para estimar las posibles víctimas que podrían resultar heridas como consecuencia de la ocurrencia de eventos como los considerados en cada municipio. En general, la mayoría de los municipios no supera las 10 personas heridas; sin embargo existen lugares en los que este número puede llegar hasta las 1,000 personas e incluso superarlo, como ocurre en Barcelona y sus alrededores en donde se alcanza como cifra cumbre alrededor de las 20,000 personas.

municipios oscilan entre las 10 y 100 personas que podrían quedar sin vivienda; un importante número de ellos se encuentran entre el rango de 100-1000, siendo pocos los que superan este intervalo.

### Estimación de pérdidas económicas

La estimación de las pérdidas económicas ha sido realizada tomando sólo en cuenta el daño físico de los edificios. La misma se realiza como el producto entre el valor del daño observado en el edificio y el valor de la reposición de dicho edificio, resultando el nuevo edificio, en la mayoría de los casos, de mejor material de construcción.



**Figura 5.** Distribución de las pérdidas económicas consecuencia del daño físico experimentado por los edificios.

Por otra parte, la estimación del número de personas sin vivienda se realizó como el producto entre los edificios inhabitables y el número de personas promedio por edificio en cada municipio. En los resultados obtenidos de estas estimaciones que la mayoría de los municipios oscilan entre las 10 y 100 personas que podrían quedar sin vivienda; un importante número de ellos se encuentran entre el rango de 100-1000, siendo pocos los que superan este intervalo.

Las pérdidas estimadas oscilan entre las 0 pesetas y cerca de 500,000 millones de pesetas. Afortunadamente, la gran mayoría de los municipios se encuentran en los rangos de menores pérdidas; las pérdidas menores de los 100 millones de pesetas se localizan en toda la parte central de Cataluña y en pequeños municipios situados al noreste de la región. Las que oscilan entre los 100 y 1,000 millones de pesetas corresponden al mayor número de municipios. Muy pocos son los municipios cuyas pérdidas sobrepasan los 10,000 millones de pesetas.

### Escenario del terremoto del *Ripollès* de 1428

Aplicando la metodología descrita hasta aquí a los municipios que se vieron afectados por el terremoto del *Ripollès* de 1428 (catalogado como de  $I_0 = IX$ ) - tomando como base el mapa de intensidades probablemente percibidas en esos lugares (Secanell, 1999) - se ha realizado la simulación del escenario de lo que serían las consecuencias para la Comunidad de Cataluña de la ocurrencia de un terremoto de características focales semejante a éste. El escenario total resultante es la suma global de los efectos determinados en cada uno de los municipios afectados, o lo que es lo mismo de los escenarios estimados para cada municipio (Tabla 3).

**Tabla 3.** Simulación de escenario del terremoto del *Ripollès* de 1428.

Edificios con daño						Relación de daño (%)	Área totalmente destruida (m <sup>2</sup> )	Escombros generados (m <sup>3</sup> )
0	1	2	3	4	5			
381,945	261,029	102,147	30,232	7,088	1,177	43	207,712	944,125
<b>Edificios inhabitables</b>	<b>Personas sin vivienda</b>	<b>Heridos leves</b>	<b>Heridos graves</b>	<b>Muertos</b>	<b>Pérdidas (Mpta)</b>	<b>Pérdidas (% PIB Cataluña)</b>	<b>Inversión para restituir inhabitables (Mpta)</b>	
23,570	136,901	21,400	4,502	1,601	828,280	8	175,955	

La tabla 3 resume el escenario resultante. En ésta se muestra la distribución de los edificios que potencialmente resultarían afectados por la acción sísmica, según los grados de daños ya indicados. Más del 48% de los edificios de los municipios afectados no experimentarían ningún tipo de daño; del restante 52%, se espera que más del 46% sufra daños de grados 1 y 2; cerca del 4% daño 3 y el resto se distribuye entre los grados 4 y 5. La relación de daño resultante establece que aproximadamente el 43% de los edificios de Cataluña experimentarían algún tipo de daño en la escala 1-5, de producirse un evento sísmico como el del *Ripollès* de 1428. El número de edificios completamente colapsados superaría los 1,000, lo que representa la destrucción total de un área de vivienda superior a los 200 mil metros cuadrados y una generación de escombros que excedería los 900 mil metros cúbicos. Como resultado de todo esto, se estima que los edificios inhabitables superarían los 23,000 lo cual se traduce en cerca de 140,000 personas sin vivienda.

El daño físico a la población se traduce en más de 20,000 personas con heridas leves, superior a 4,000 heridas de gravedad y una cifra de muertos que rebasaría ampliamente las 1,000 personas. Las pérdidas económicas superarían los 800 mil millones de pesetas que en términos del Producto Interior Bruto de Cataluña (10.3 billones de pesetas en 1991) representa el 8%, una cifra semejante al aporte del sector de la construcción, en esa fecha, a la economía



de la región (*Web* del IEC). Por último, la inversión necesaria para el restablecimiento de los edificios considerados inhabitables asciende a cerca de 176 mil millones de pesetas.

## Conclusiones

Se ha desarrollado una metodología que permite realizar estimaciones de los daños que conforman los escenarios sísmicos necesarios para la planificación de las emergencias sísmicas. Dicha metodología ha sido aplicada a todos los municipios de Cataluña, obteniéndose como resultados escenarios para cada uno de ellos en función de la intensidad macrosísmica asignada a los mismos por los estudios de peligrosidad de la región. Igualmente se ha aplicado la metodología para la simulación de los efectos, en toda la región de Cataluña, de un terremoto concreto como el del *Ripollès* de 1428.

## Referencias

Applied Technology Council, (1985), "Earthquake damage evaluation data for California,(ATC-13). Redwood City, California.

Chávez, J. (1998). "Evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo sísmico a escala regional: aplicación a Cataluña". Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 343 pp.

Coburn, A. W., Spence, R.J.S. y Pomonis, A. (1992), "Factors determining human casualty levels in earthquakes: Mortality prediction in building collapse". *Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering*. 5989 -5994. Madrid.

Mañà, F. (1995), "Vulnerabilidad de las construcciones tradicionales respecto a un sismo de grado VI o VII. Informe ITEC, Barcelona.

Ministerio de la Vivienda, (1973), "Muros resistentes de fábrica de ladrillo (MV-201-1972)". Decreto del 20 de abril de 1972 N1324/1972, BCN-COACB.

Secanell, R. (1999), "Avaluació de la perillositat sísmica a Catalunya: Anàlisi de sensibilitat a diferents models d'ocurrència i paràmetres sísmics. Tesis Doctoral en preparación. Universidad de Barcelona. Barcelona, 335 pp.

Secanell, R., Goula, X., Susagna, T., Fleta, J., Roca, A.(1999). Mapa de zonas sísmicas de Cataluña. 1<sup>er</sup> Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. Murcia.

Web del Institut d'Estadística de Catalunya: <http://www.gencat.es>

## Agradecimientos

La realización de esta investigación se llevo a cabo gracias a la concesión de una beca del Instituto de Cooperación Iberoamericano al primer autor. Los datos utilizados fueron suministrados por el *Institut d'Estadística de Catalunya* y el *Gruppo Nazionale di Difesa dei Terremoti* de Italia.